

報 告

A V Rを用いた R Cサーボモータ評価装置の試作

高橋恭一¹

¹ 総務課技術室(Technical Section, General Affairs Division, Nagaoka National College of Technology)

A TRIAL PRODUCTION OF THE RC SERVOMOTOR EVALUATION DEVICE USING AVR MICROCONTROLLER

Kyouichi TAKAHASHI¹

和文要旨

近年において普通の家電製品, WEB カメラ, 遠隔操作アクチュエータなどにロボット技術の導入が目覚しい. ここに用いられる動力源として, オープンループで容易に位置決めが可能なパルスモータよりクローズドループ制御技術を併用した DC モータや AC モータが多用されている. 各種モータの選定には, 制御対象物理量としてトルク制御, 速度制御, 角度制御, およびモータの必要容量の各要素により選択される.

本研究では, マイクロコントローラに Atmel 社の AVR を使用し, DC サーボモータの分類に入る RC(Radio Control)サーボモータモジュールについて, 制御パルス幅に比例して回転角度制御を行う評価装置を試作し, 評価, 検討を試みた.

Key Words : RC servo motor, precisely rotary angle control, PWM, AVR

1. 緒言

近年ではロボット技術が目覚しく進歩し, 例えばエアコンの中にはクリーニング・タイマが装備されていて, エアコン内部を定期的にセルフクリーニングする. 或いは, 人の居るところを追尾しながら, 暖気, 寒気の別で発生する対流を勘案し放射方向をコントロールする.

このように民生用機器の中にクリーンロボットや気流ロボットなどの名称で呼ばれる機能に, ロボット技術の導入が進んでいる.

ここに用いられている動力源として, オープンループで容易に位置決めが可能なパルスモータよりクローズドループ制御技術を併用した各種のモータが多用されている. サーボモータは, このクローズドループ制御技術を利用したモータモジュールである. モータとして, AC(Alternating Current)モ

ータ, DC(Direct Current)モータがあり, 使途の制御対象物理量であるトルク制御, 速度制御, 角度制御およびモータの必要容量の各要素から, より適した種類が選択される.

本研究では, 映像・音響機器, デジタル家電製品, 自動車等, 更にコントローラブルな用途として各種装置の遠隔操作のアクチュエータ, ロボット関節など広範囲に活用されている DC サーボモータに属する RC(Radio Control)サーボモータに着眼し, 回転角度制御に Atmel 社の AVR を採用し, それによる角度制御の評価装置を試作し, その評価を行った.

2. R Cサーボモータ及びA V Rのタイマ

RC サーボモータは DC モータ制御にクローズドループ制御技術を用いたもので, 無線操縦用途に特化したモータモジュールである.

用いられる RC モータ(型名:Micro 2BBMG)は、金属製の減速機を内蔵し、入手が容易で安価でロボット技術の分野では汎用的に活用されている。

RC サーボモータを制御する CPU として、多種のものがあるが、マイクロコントローラ・PIC(Peripheral Interface Controller)よりも後開発でインストラクションの実行効率がよく、多機能、アーキテクチャが整然としている等の長所から Atmel 社の AVR(Alf Egil Bogen, Vegard Wollan, RISC)製品群の中から、ATmega168 を使用した。

2. 1 RC サーボモータの制御法

実験試料の RC サーボモータの仕様を表 - 1 に記す。

RC サーボモータの引き出し線は、電源ラインを含めわずか3線である。この中から電源とアースライン(信号と共有)を除くと、残る1線で制御することになる。

一般的に言われている制御概要を図 - 1 に示す。

図中、各タイミングの持つ意味及び代表的な値について述べる。

① τ_p : 制御パルスの1周期 [msec] τ_p の値は、20 [msec] ~ 50 [msec] の範囲で許容される。この長さによってサーボロック時の保持力に影響がある。

② τ_n : 中立位置制御時間 [msec]
 τ_n はサーボモータの中立位置の制御で、多くのサーボモータは 1.5 [msec] である。

③ τ_w : 制御可能時間幅 [msec]
 τ_w が回転角度の制御可能なパルスの幅で、機械的可動範囲の概ね 90 [%] 程度である。又、多くのサーボモータはこの時間幅は 1 [msec] に設定されている。

以上から、サーボモータの角度制御は1本の電線に、(1)式で決まるパルス幅を送ることで角度制御がなされる。

$$Pr = Kr \left(\tau_n \pm \frac{\tau_w}{2} \right) \quad [^\circ] \quad (1)$$

Pr : 回転角度 $[^\circ]$

Kr : 比例定数

次に本研究で扱う RC サーボモータの機械的回転角度の概要を図 - 2 に記す。

図中、制御可能範囲が $e-s$ で、Micro-2BBMG において 217 $[^\circ]$ である。又、中立位置は n で、絶対角度で 120 $[^\circ]$ である。

表 - 1 RC サーボモータ(Micro 2BBMG)の仕様

ITEM	SIZE [mm]	WEIGHT [g]	VOLTAGE 4.8 [V]	
			SPEED Sec/60 $[^\circ]$	TORQUE [Kg/cm]
Micro 2BBMG	28×14×29.8	28	0.17	5.4

3~6 [V]

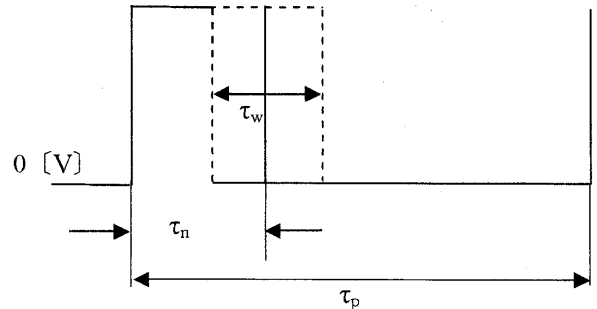


図 - 1 RC サーボモータの制御パルス概要

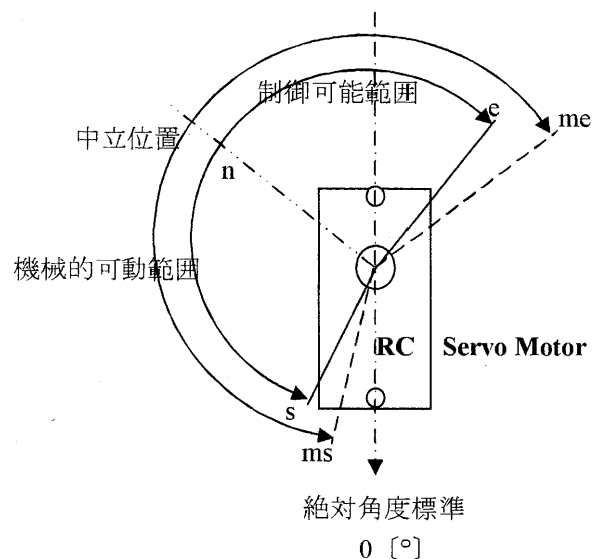


図 - 2 回転角度の概要

$me-ms$ は機械的可動範囲、242 $[^\circ]$ である。

2. 2 パルス幅基準と角度基準の整合

2. 1 で述べたように、図 - 1 のパルス幅の基準と、図 - 2 の角度基準が異なっている。そこでパルス発生を考え易くするために、本研究では(1)式から制御開始位置相当パルス幅 τ_s [msec] 及び制御終了位置相当パルス幅 τ_e [msec] を次式とし、

$$\tau_s = \tau_n - \frac{\tau_w}{2}$$

$$\tau_e = \tau_n + \frac{\tau_w}{2}$$

制御パルス幅の値 τ を

$$\tau_s \leq \tau \leq \tau_e$$

とする。この範囲のパルス幅で回転角度を制御する。

ここで回転角度の分解能は、制御パルス幅 τ の分割数で決まる。

RC サーボモータ自体の分解能については、本研究の主旨ではなく、仕様表にも表記されていない為に割愛するが、概ね 8 [bit] と見積もっている。

2. 3 AVR による PWM 波の生成

2. 1 及び 2. 2 より、RC サーボモータの制御には、PWM(Pulse Width Modulation)波が必要である。

ここで AVR に装備してあるタイマ&カウンタに注目すると、8 [bit] 2 個、16 [bit] 1 個の合計 3 個がある。この中で、16 [bit] タイマ&カウンタの Timer/Counter 1 を使用する。

Timer/Counter 1 のアーキテクチャ¹⁾を図 - 3 に示す。

図中、タイマ/カウンタ(TCNT1)、比較レジスタ(OCR1A,OCR1B)、捕獲レジスタ(ICR1)の各レジスタは 16 [bit] で構成されている。

これらのレジスタとカウンタを使用することによって、正確な事象管理、波形生成、信号タイミング計測などが可能である。

波形生成機能の中で PWM 制御は、2 チャンネルのコンペアマッチの設定が可能であることから、PWM 波の出力が可能である。

メインのカウントクロックは、システムクロックをプログラム可能なプレスケラ(前置分周器)を経由して供給される。

次に、AVR における PWM 波の生成動作について述べる。

PWM 波生成動作には、高速パルス幅変調動作と位相基準パルス幅変調動作が指定できる。

両動作の相違点としては、カウンタが最大カウント値に達した時点で、高速パルス幅変調動作はカウンタをクリアする。一方の位相基準パルス幅変調動作は、最大カウント値からカウントダウンする。

つまり、高速パルス幅変調動作におけるカウンタの数値内容は単一傾斜(鋸歯状)型であり、位相基準パルス幅変調動作は、両傾斜(三角波)型とな

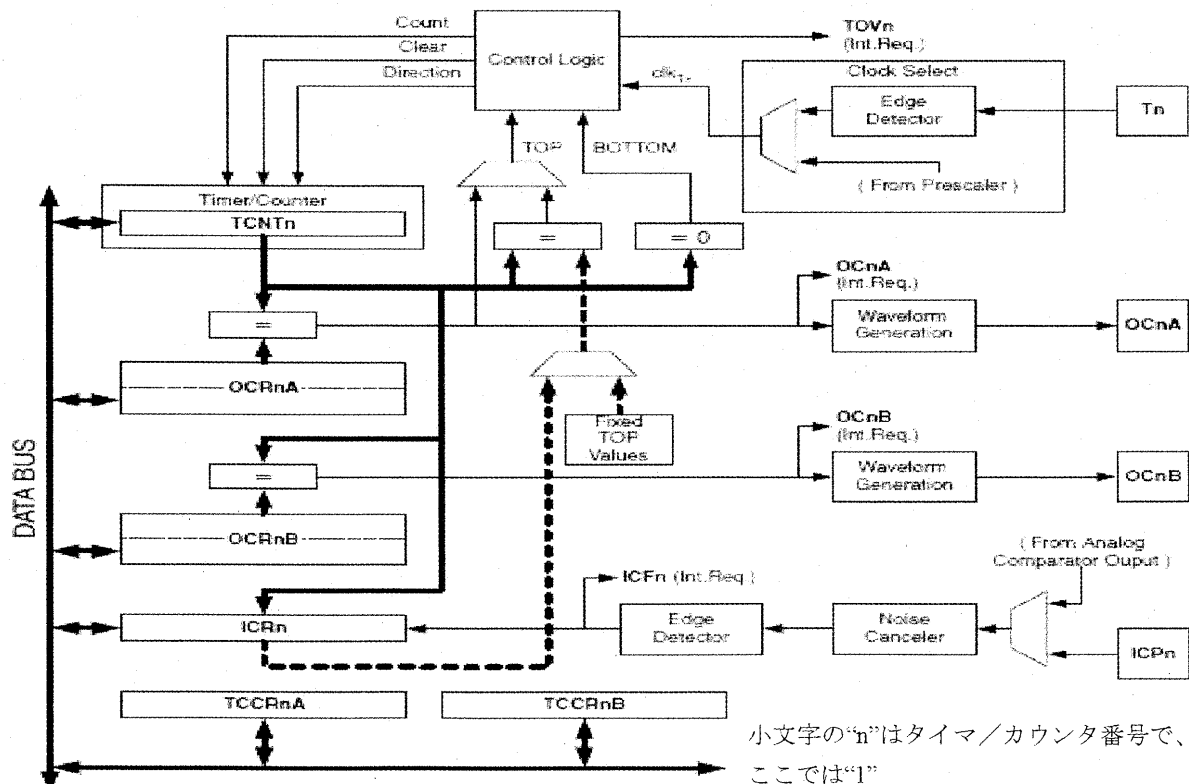


図 - 3 Timer/Counter1 システム構成図

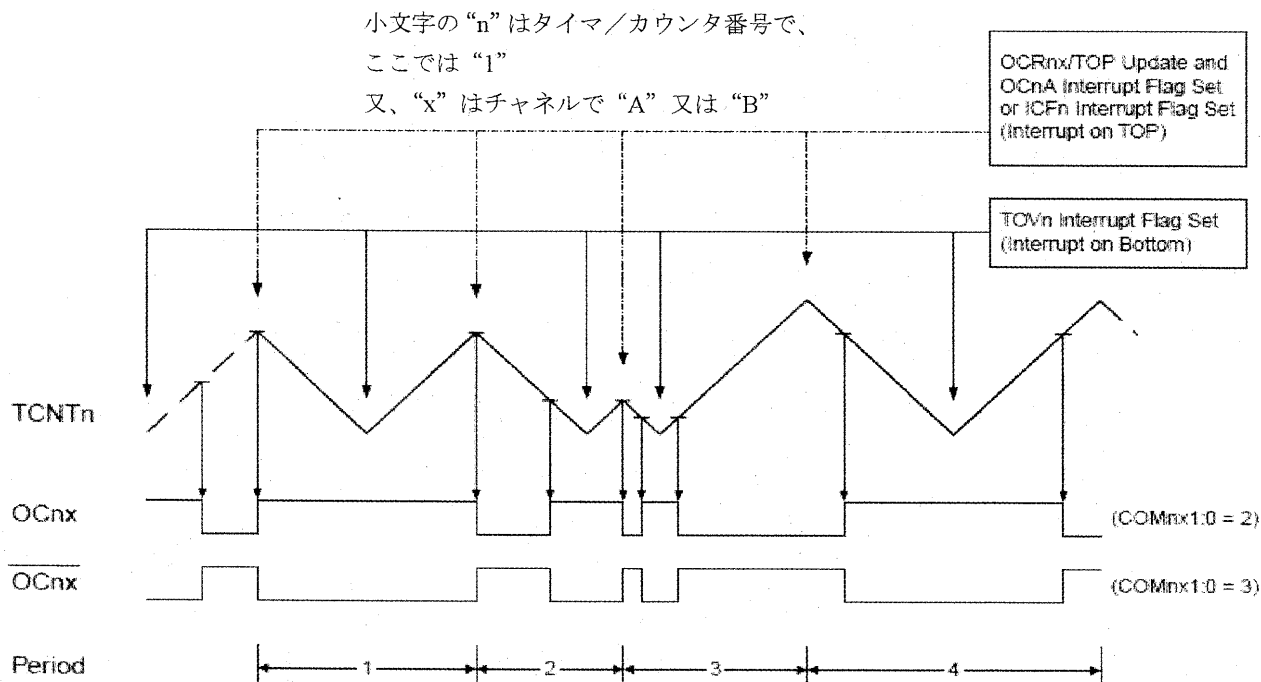


図 - 4 位相基準 PWM 動作タイミング

る。

ここでは、両傾斜型の位相基準パルス幅変調を用いる。そのタイミングチャート¹⁾を図 - 4 に記す。

位相基準パルス幅変調動作での最大設定値は 8,9,10 [bit] いずれかに固定、もしくは図 - 3 中の OCR1A,ICR1 に設定されたどちらかの値になる。又、許される最小設定値は 3, 最大分解能は 16[bit] である。

PWM 波の分解能 R_{PCPWM} は次式¹⁾である。

$$R_{PCPWM} = \frac{\log(TOP + 1)}{\log 2} \text{ [bit]}$$

TOP : 8,9,10 [bit] いずれかの最大値,
もしくは OCR1A,ICR1 の値

位相基準 PWM 動作でのカウンタは、カウンタ値が固定値設定の 0FF [HEX], 1FF [HEX], 3FF [HEX], あるいは OCR1A,ICR1 の何れかと一致するまで増加する。カウンタ値がここに達したら、カウント方向が反転し 0 までカウントダウンする。

ここで TOP 値を固定モード指定, OCR1A に TOP 値以内の数値設定をする。と、カウンタのカウント過程で OCR1A に設定された数値に達した時点で、コンペア出力(OC1A)が反転出力する。

カウント内容がボトムから TOP 値を過ぎて次のボトムに至る周期内で, OCR1A に設定された値で反転した波形が OC1A に生成出力される。これが PWM 波となる。このときの発生周波数

$f_{OCnxPCPWM}$ は、次式¹⁾による。

$$f_{OCnxPCPWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{2 \cdot N \cdot TOP} \text{ [Hz]}$$

$f_{clk_I/O}$: メインクロック周波数 [Hz]

N : プレスケラ値 (1,8,64,256,1024)

TOP : 0FF,1FF,3FF [HEX]

ここでは、 $f_{clk_I/O}$ が 24 [MHz], TOP 値を 10 [bit] (3FF [HEX]), N を 256 に設定し、発生周波数が 2. 1 で述べた $1/\tau_p$ の範囲に入るようにした。

他の方法による処理は割り込み処理によるカウンタコントロール法があるが、生成された PWM 波にジッタを生じる懸念がある。

ジッタ変動現象は、サーボモータをロボットの関節に使用した例では、小刻みな振動と消費電流の増加を招くという悪影響がある。

ここでは、AVR の OC1A, OC1B 各コンペア出力端子に生成された連続 PWM 波を直接 RC サー

ボモータの制御に使う。

3. 評価装置の構成及び測定

2. で、RC サーボモータの制御方法が明らかになり、AVR による制御法、PWM 波の生成が可能になったことが分かった。

評価装置概要と、AVR 基板には以下の装備をした。

- ① AVR には ATmega168 (バス幅 8 [bit], フラッシュメモリ容量 16 [KByte]) を使用した。
- ② 開発言語 BASIC コンパイラ
- ③ AD コンバータ入力 1 にポテンシオメータを接続して、角度情報を読み取る。
- ④ AVR の OC1A, OC1B の 2 ポートから、RC サーボモータ (Micro 2BB-MG) 2 個独立の制御を行う。
- ⑤ AVR のインターフェースは各種あるが、正確な置数設定が必要なことから、RS-232C を装備し、以下のフォーマットで使用する。

ボーレート : 115200 [Baud]
 ストップビット : 2 [bit]
 パリティ : なし
 フロー制御 : なし

その他には、基本的な測定及び校正作業の基準として、全周分度器を加工して RC サーボモータに装備した。

3. 1 回転角度の電氣的読み取りと校正

RC サーボモータの回転角を電氣的に読み取るため、RC サーボモータの回転軸にポテンシオメータを直結した。その様子を図 - 5 に記す。

AVR に回転角度データを読み取る方法は、AVR に内蔵の 10 [bit], シングルエンド入力 8 チャンネルの AD コンバータの 1 チャンネルを使って行う。

主な AD コンバータの動作環境を以下に述べる。ポテンシオメータと A/D コンバータの接続はレシオメトリック接続²⁾にし、変換基準用精密電源は使わないこととした。

AVR のポートとポテンシオメータの接続図²⁾を図 - 6 に示す。

AVR におけるアナログ電源、基準電圧源とデジタル電源との電源アイソレーションは、図中の L1, C7 で構成されたローパスフィルタで行う。

グラウンドラインは、デジタルとアナログ共通になっている。又、AD コンバータの変換動作時におけるノイズ低減機能は使用しない。

3. ⑤の装備によりパソコンから送出データを 902~996 の範囲で 5 刻みに送出、RC サーボモータ

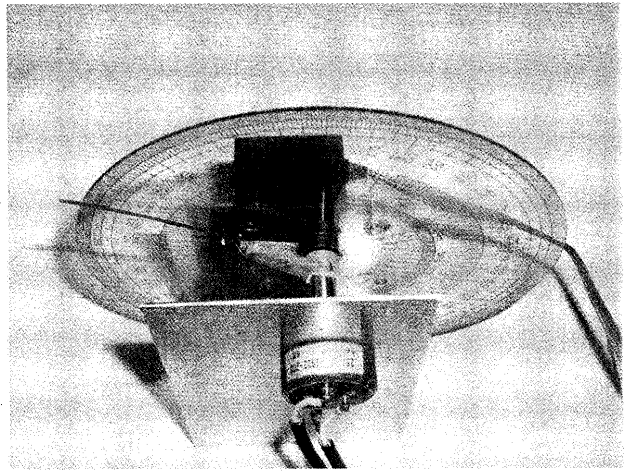


図 - 5 回転角度の電氣的読み取り
(ポテンシオメータの装備)

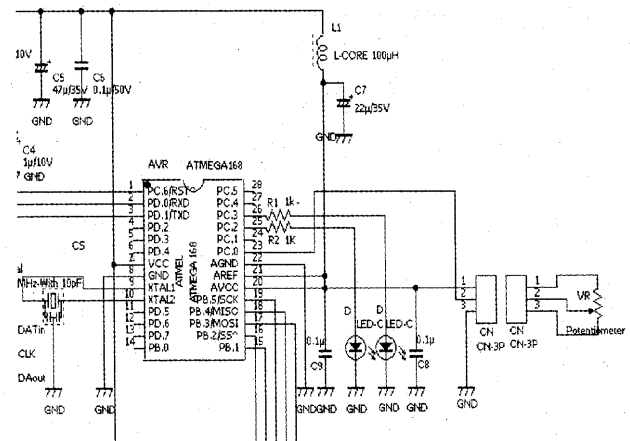


図 - 6 角度読み取り部の接続図

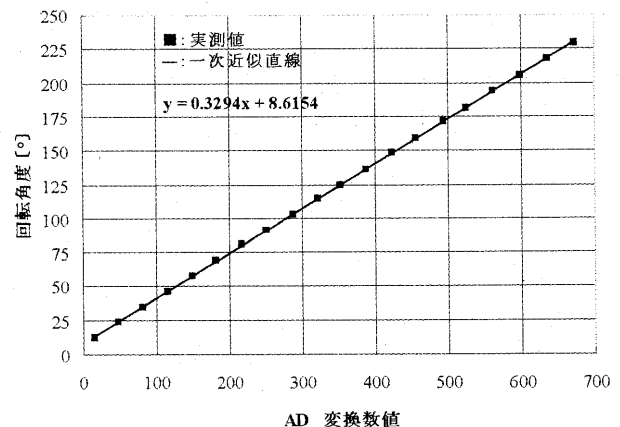


図 - 7 回転角度に対する AD 変換数値

タの停止位置を全周分度器で読み取る。一方、回転角度に対応した AD 変換数値は、RS-232C からパソコンで受信した。

図 - 5, 図 - 6 の構成で、回転角度に対応した AD 変換数値をエクセルに取り込みグラフ化した結果を図 - 7 に示す。

図から、測定結果と近似直線とは良く一致し、読み取り回転角度と AD 変換数値は直線性を示している。

以上より、AD 変換数値 $ADcny$ から回転角度への変換値 Rx は、次式により得られる。

$$Rx = 0.3294 \cdot ADcny + 8.6154 \quad [^\circ]$$

3. 2 送出データと回転角度の校正

パソコンからの角度情報を RS-232C 通信で送出すると、AVR のタイマでは 2. 3 で述べた方法により PWM 波が出力される。

そこで、パソコンからの情報に対する、RC サーボモータの回転角度の校正を行う必要がある。校正は測定結果から行う。

測定結果を図 - 8 に、評価装置を図 - 9 に示す。

測定結果のグラフの直線近似式から、送出データ Ds から設定回転角度 Ra への変換は次式による。

$$Ra = 2.2778 \cdot Ds - 2042.5 \quad [^\circ] \quad (2)$$

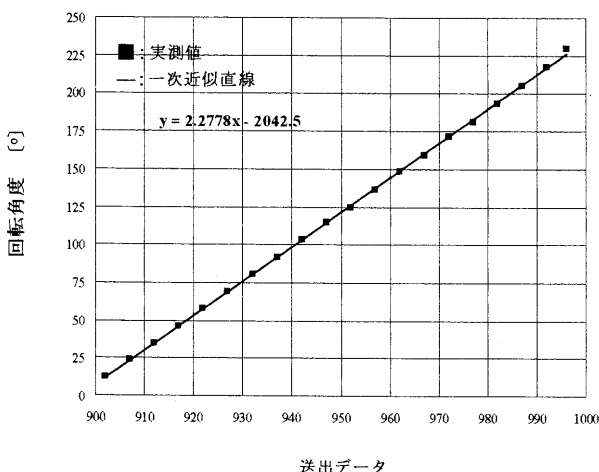


図 - 8 送出データに対する回転角度

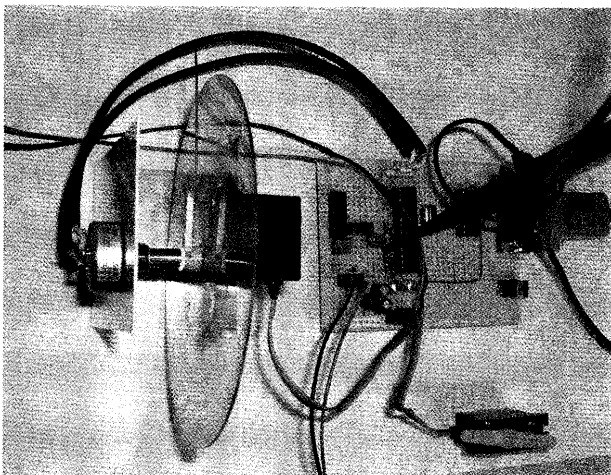


図 - 9 RC サーボモータ評価装置

ここで送出データ Ds は整数である。従って、(2)式の係数 “2.2778” が本装置の角度分解能になる。

パソコンで与える数値 1 ステップの変化は、RC サーボモータにおける回転角度 2.2778 [°] の回転変化を指示することになる。

送出データ Ds の範囲は、2. 2 の図 - 2 で示した $e \sim s$ を図 - 5 の装置により確認したもので、RC サーボモータにおいて 902~996 の範囲であることが分かった。

なお、この数値範囲を大きく逸脱すると、RC サーボモータの中にある、DC モータを焼損する。

3. 3 回転角度制御とレスポンス

パソコンから RS-232C を経由して、AVR に設定回転角度情報を送出する。その情報を受けて RC サーボモータは動作し、連結したポテンショメータからの回転角度情報を同様に RS-232C から送出する。

以上の RC サーボモータ評価装置の構成及び測定に基づき、装置の試作を行った。

ここで送出データ Ds を (2) 式で校正した設定回転角度 Ra と、受信して得られた回転角度校正値 Rx の $Ra - Rx$ 特性を図 - 10 に示す。

図から良好な直線性が見て取れる。

制御可能回転角度の範囲は、12~227 [°] である。

AVR からの送出データ間隔は 20 [msec] で、RS-232C のフォーマットから、送出に要する時間を計算すると、送出データ長は 2 [Byte] の整数であることから、0.1736 [msec] となる。

このことから通信時間は、観測間隔時間にほぼ影響しない。

又、AD 変換時間は観測間隔時間中に含めるソフトウェアとした。

次に、回転角度設定に対する時間応答のグラフを図 - 11 に示す。

図で傾きは回転速度を表していて、右回転、左回転とも 72 [°] / 200 [msec] 程である。

この数値は、2. 1 の表 - 1 の仕様と概ね同じであった。

PWM の一周期が 20 [msec] であるから、72 [°] の回転角度で安定させるには、最低 10 個のパルスが必要である。

又、PWM 波と観測タイミングには位相差があると考えられるが、結果から観測間隔は適正といえる。

両方向回転は、180 [°] 相互の反転動作である。

ここで左回転と右回転を比較すると、右回転の

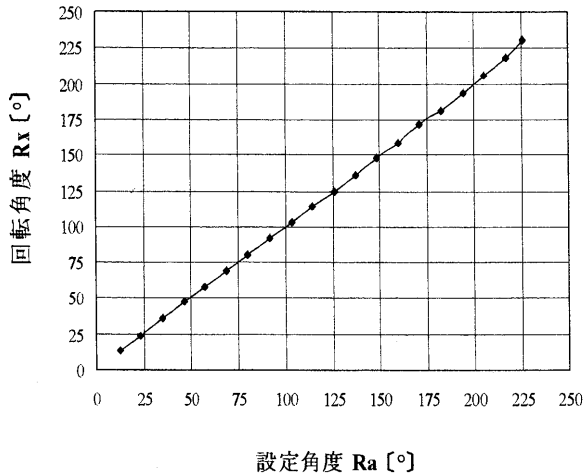


図 - 10 設定角度に対する回転角度
($R_a - R_x$ 特性)

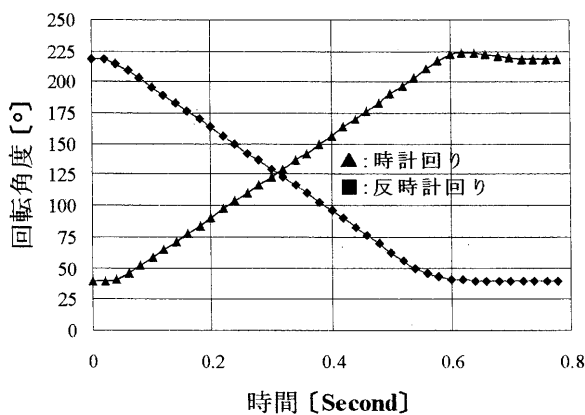


図 - 11 回転応答特性

み 5 [°] 程度のオーバーシュートが観測された。

4. 検討とまとめ

RS サーボモータの評価装置を試作し、各種無負荷時の特性を測定した。

これまでの検討、結果から、表-1 の仕様を満たしていることが分かった。

3. 2 で示したとおり、本評価装置の分解能は 2.2778 [°] である。

これは本評価装置における AVR の動作モードでは、PWM 波の分解能が、10 [bit] であることに加えて、RC サーボモータのコントロールパルス幅 τ_w と全体周期 τ_p の比が大きいことに起因する。

改善方法として、 τ_w 、 τ_p をコントロールするタイマ/カウンタを分離活用することで改善可能で

ある。

また、右回転と左回転のレスポンスが異なり、右回転時比較的大きな角度ステップの設定でオーバーシュートが顕著に生ずる点が明らかになった。この原因については未調査である。

データを示せなかったが電源電圧変動により、RC サーボモータの挙動が不安定になることも観察された。電源容量、電源供給コード・コネクタ部等の抵抗による電圧降下が原因の一つに考えられる。

タイマ/カウンタによる連続 PWM 波制御は、RC モータのサーボロック状態でジッタの少ない安定動作が得られた。

評価装置としては、一つの AVR チップで RC モータの独立コントロールが 2 個可能である。これは 2 軸協調制御による、高度な運動能力を与える可能性があり有望であると考ええる。

ここで小トルクにおいて、オープンループで簡便な制御が可能なパルスモータよりも、DC サーボモータが多用される原因について考察する。パルスモータの短所として以下の項目が考えられる。

- ① トルク/重量比が小さい。
- ② 脱調の自己検出が不可能。
- ③ トルクリップル(コギング)が大きい。

DC サーボモータにはこれらの短所がないため、現時点では多用されているものと推察される。

謝辞： 本研究は、長岡工業高等専門学校地域共同テクノセンターからの研究補助費及び長岡工業高等専門学校電気電子システム工学科からの技術職員支援費の支援のもとに行われたもので、ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) Atmel 社編：ATmega48/88/168 Datasheets, 2007.
- 2) 高橋恭一：長岡工業高等専門学校技術室だより, 第 5 号, pp1-7, 2008.

(2008.1.21 受付)